

令和 6 年 9 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18834

研究課題名（和文）UAV搭載型ディストロメータの開発および雨滴粒径・降雨強度の鉛直・縦横断移動測定

研究課題名（英文）Development of UAV-mounted disdrometer for enabling traverse measurement of raindrop size distribution and rainfall intensity in the air

研究代表者

仲吉 信人（Nakayoshi, Makoto）

東京理科大学・創域理工学部社会基盤工学科・准教授

研究者番号：90706475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：UAV搭載型の雨滴粒径分布、降雨強度測定機器 Image Disdrometerを開発した。Spresenseマイコンを用いたカメラシステムを自作することで、小型・低重量・低消費電力の機器を開発できた。地上設置したLPMとImage Disdrometerで測定した雨量強度、雨滴粒径分布を比較し、両者が対応していることが確認できた。上空での測定時に懸念される高風速の影響、飛行に伴う振動がImage Disdrometerの測定精度に与える影響は無視できることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

雨滴粒径分布は降雨レーダによる雨量測定に不可欠な情報である。日本では全土に偏波レーダが配備されており、偏波レーダによる雨量プロダクトが利用できるが、推定された雨滴粒径分布関数が不正確であれば雨量プロダクトに誤差が生じる。偏波レーダのパラメータ推定は、地上に設置してディストロメータが用いられているが、降雨レーダが視準している上空の雨滴粒径分布と地上のそれが一致すると言える物理的合理性はない。本研究成果であるUAV搭載型Image Disdrometerはレーダが視準している高度での雨滴粒径分布を測定できる唯一のセンサであり、降雨プロダクトの高精度化、降雨災害の予測精度向上に寄与すると考える。

研究成果の概要（英文）：We developed a UAV-mounted device for measuring raindrop size distribution and rainfall intensity, called the Image Disdrometer. By using a Spresense microcontroller to create a custom camera system, we were able to develop a device that is small, lightweight, and low in power consumption. A comparison of the rainfall intensity and raindrop size distribution measurements taken by a ground-installed LPM and the Image Disdrometer confirmed that both sets of data corresponded well. It was also confirmed that the impact of high wind speeds, which are a concern during aerial measurements, and the vibrations caused by flight, have negligible effects on the measurement accuracy of the Image Disdrometer.

研究分野：都市気象学

キーワード：雨滴粒径分布 UAV Image disdrometer microphysics

## 1. 研究開始当初の背景

ディストロメータとは雨滴粒径と降雨強度を測定するセンサの総称である。雨滴粒径分布は降雨レーダによる雨量測定に不可欠な情報である。単波レーダを用いる場合、雨滴粒径分布を仮定し、レーダ反射強度から降雨強度を推定し、地上雨量で校正し、雨量強度プロダクトを構築している。偏波レーダを用いる場合は、雨滴粒径分布に関するパラメータを偏波レーダの反射パラメータから推定し、それに基づく降雨強度プロダクトを構築している。日本では全土に偏波レーダが多数配備されており、偏波レーダによる雨量プロダクトが利用できるが、雨滴粒径分布に関わる推定が不正確であれば雨量プロダクトに誤差が生じる。偏波レーダのパラメータ推定は、地上に設置してディストロメータが用いられているが、降雨レーダが視準している上空の雨滴粒径分布と地上のそれが一致すると言える物理的合理性はない。上空の雨滴粒径分布を測定し、偏波レーダによる推定精度の検証が必要であるが、上空の雨滴粒径分布を直接測定する術は現状、ビデオゾンデのみである。ビデオゾンデはビデオカメラをつけたバルーンを放球し、バルーンの軌跡に沿った雨滴粒径分布を測定する。この手法では、放球できる場所・タイミングが限定されること、センサが一回毎の使い捨てであること、同じ高度で測定できる雨滴数が少ないことなどが課題である。

一方、申請者のグループは、Image Disdrometer という新たな雨滴粒径測定原理の開発を進めてきた。Image Disdrometer は透明平板、ワイパー、カメラからなり、平板に付着した雨滴のフットプリントを撮影し、画像解析により球等価直径に変換することに特徴がある(小野村ら、2019)。平板に付着した雨滴をターゲットとすることで、従来の画像式 disdrometer と違い、高性能カメラを必要とせず、測定器の小型化・低消費電力化が可能である。本研究申請時は、ラズベリーパイにより、画像撮影とワイパーの間欠動作させるシステムを構築したが、ラズベリーパイを利用したため、消費電力が大きく、また、自動車ワイパーを利用したことで、機器が大型で UAV 搭載可能なサイズではなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、小型・低消費電力・低コストの新たなディストロメータを開発することを目的とする。開発した機器を UAV に搭載し、世界に例のない雨滴粒径・降雨強度の鉛直-縦横 断移動測定を実現する。高層での移動測定を可能とすることで、降雨レーダが測定ターゲットとするエリアでの雨滴粒径・降雨強度が観測でき、それにより、降雨レーダの雨量測定精度の直接的検証と雨量評価アルゴリズムの改良が可能となる。

## 3. 研究の方法

下記の研究・開発を行った。

- (1) Image Disdrometer の小型・低消費電力化
- (2) Image Disdrometer の UAV への搭載
- (3) その他の改良
- (4) 開発した Image Disdrometer の精度検証

## 4. 研究成果

- (1) Image Disdrometer の小型・低消費電力化

ラズベリーパイから、Sony の Spresense ボードを用いたカメラ撮影システムへと変更を行った。ラズパイの消費電力は 12.5 W であり、Spresense に変更したことで 0.1 W 程度に削減された。さらに、自動車用ワイパーからヘルメット用ワイパーに変更することで小型化を実現した(図1)。

一方、Spresense を用いた撮影システムでは画像のサンプリング間隔、および解像度はラズパイを用いたものよりも低下し、640×480 pixel(VGA 解像度)で 4~5fps の撮影である。Image Disdrometer では連続する画像差分から新たに付着した雨滴を同定するが、インターバルが長くなれば、外部光の変化や雨滴以外の映り込みにより雨滴同定に誤差が生じる。4 fps であれば解析に大きな支障はなく、雨滴の同定に問題はなかった。解像度の影響について

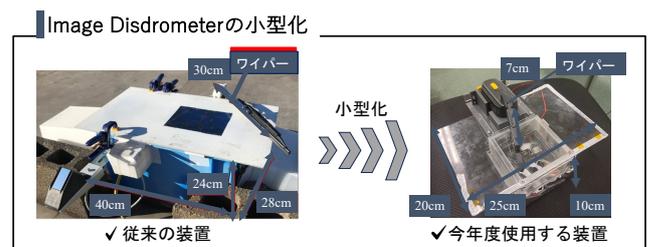


図1 Image Disdrometer の新旧比較。新バージョンの水平面のサイズは透明平板のサイズ。

は次節で述べる。

## (2) Image Disdrometer の UAV への搭載

防水ドローンとして Swell pro の Splash drone 4 を選定した。これは機体重量が 2 kg で積載重量が 2 kg である。ドローン底面のカメラ固定ネジを用い、Image disdrometer を搭載するための治具を 3D プリンタで作成した(図 2、図 3)。プロペラに治具が干渉しないこと、積載重量以内に収めること、耐久性をあげつつ軽量化すること、抗力を下げるために治具の高さを抑えること、ただし、Image disdrometer の撮影エリアを確保すること、を意識し図 2 の治具をデザインした。本治具に Image disdrometer を組み込んだ場合、撮影エリアは 62x82 mm であり、画像解像度は約 0.2 mm/pixel となる。0.2 mm 程度以下の小粒径の雨滴の同定に不向きである。撮影領域を狭め画像解像度を上げる検討が必要であり、それについては今後の課題である。

## (3) その他の改良

### ① 雨滴視認性の向上

雨滴も透明、平板も透明であるため、雨滴の輝度値が小さく、雨滴のご検知に繋がっていた。そこで、上記の改良に加え、透明平板の周囲に LED を貼り付け、透明平板内に発光させることで、雨滴の視認性を向上させた。

### ② 雨滴落下速度同定の検討

一般的な disdrometer では雨滴毎の落下速度も測定する。これにより単位体積当たり、各サイズの雨滴の存在数を求める事ができる。Image disdrometer では雨滴サイズに応じた終端速度を雨滴落下速度と仮定しているが、乱流場では雨滴に作用する力のバランスが複雑であり終端速度になっていないと考える方が妥当である。圧力センサを用いて雨滴落下による衝撃力を検知し、雨滴落下速度を推定できないか検討を行った。用いた圧力センサは FSR-406、および MF01A-N-221-A04 である。センサ感応部に圧力が加わるとセンサの抵抗値が減少する。抵抗値変化を捉えるため圧力センサと抵抗を直列接続し、抵抗変化を電圧に変換しデータロガーで計測した。分銅をセンサ堪能部に設置した際の圧力と低下電圧の関係を図 4 に記す。センサに防水加工を施せばセンサが水に濡れても圧力と電圧低下の関係に変化がないことが確認された。次に、実降雨を模したシャワーをセンサにあて電圧変化の挙動を確認した。シャワーを当てた時間は電圧が変動していることが分かる(図 5)。シャワーを当てた時間は電圧が減少することが理想であったが、実降雨に比べ強い水圧のシャワーを当てても反応は小さい。実降雨に対する実験も行ったが(図省略)、圧力センサの感度では、雨滴落下のシグナルは捉えられない結果となった。

## (4) 開発した Image Disdrometer の精度検証

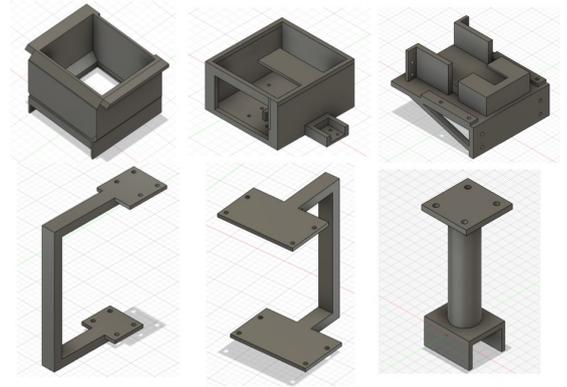


図 2 Image disdrometer の UAV 搭載用ジグ

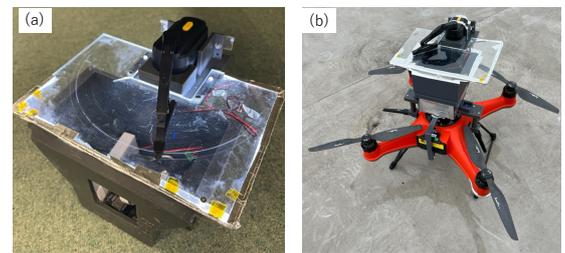


図 3 (a) image disdrometer 外観および (b) UAV にマウントした外観

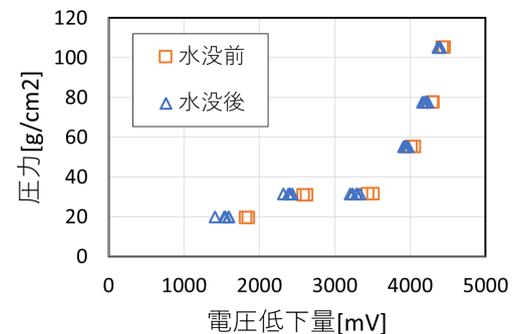


図 4 圧力センサの圧力と電圧低下の関係校正図

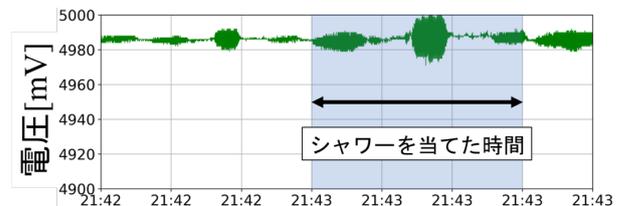


図 5 圧力センサ FSR-406 にシャワーを当てた際の電圧変化

シグナルは捉えられない結果となった。

図 6 に小型化した Image Disdrometer と LPM(Laser Precipitation Monitor)との降雨強度と雨滴粒径分布の比較実験の様子を示す。本観測は千葉県野田市にある東京理科大学キャンパス内にて、2024 年 6 月 18 日 15 時 14 分から 40 分間に小型化した Image Disdrometer を LPM 近傍に定点設置し、また 2024 年 6 月 21 日 14 時 22 分から 20 分間は Image Disdrometer を UAV に搭載し LPM 近傍に設置し、比較を行った。なお、6 月 21 日の観測では UAV のプロペラを回転させたが飛行はさせずに比較を行った。プロペラ回転による気流の影響を確認することを目的とした。実験である。両者の実験風景を図 7 に示す。

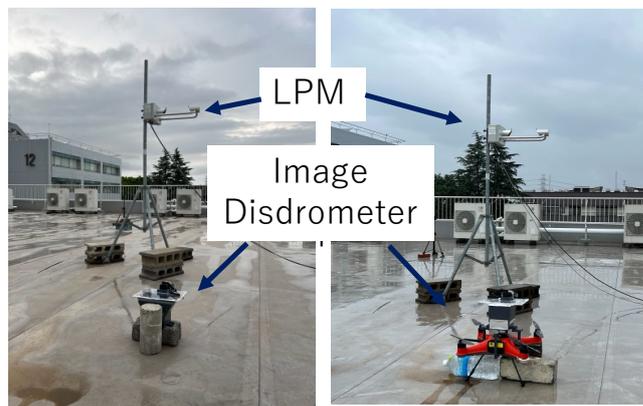


図 6 LPM と Image Disdrometer の観測風景

図 7 には Image Disdrometer と LPM で推定した雨量強度の散布図を記す。分散はあるが、両者は良く対応しているように見える。ばらつきはあるが、このばらつきの要因が Image Disdrometer の精度とは言い切れない。LPM はレーザーの照射エリアは小さく、代表性の問題が生じ、LPM 自体の不確実性も散布図のばらつきには含まれる。図 8 には Image Disdrometer と LPM で推定した雨滴粒径分布の比較を示す。どちらも観測時間中の積分量である。6/18 は、LPM では雨滴粒径 0.125 mm の個数がピークを示し、Image disdrometer はこれを大きく過小評価している。

(2)で言及したように、現状のセッティングでの画像解像度は約 0.2 mm/pixel であり、小粒径の雨滴の検出に適さない。これが Image Disdrometer での小粒径雨滴の過小評価に繋がっていると考えられる。また、図 8 で言及した LPM の代表性に起因する影響もあり得る。6/21 のイベントでは小粒径をやや過大評価しているように見える。降雨強度自体が弱いイベントであったこと、20 分の積算結果であるため、この傾向がどれほどロバストなものかを考察するにはデータが不足している。UAV のプロペラ回転の効果についてもデータの蓄積を待つ必要があるが、プロペラ回転により生じるのがダウンフォースであることを踏まえると、UAV 上部にある Image Disdrometer への影響は小さいと言えよう。

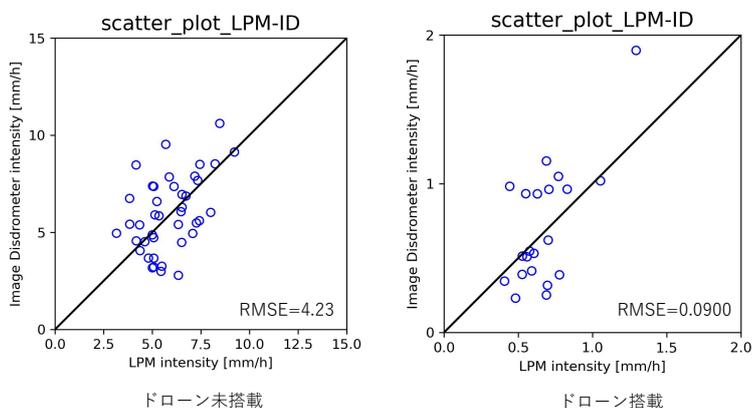


図 7 LPM と Image Disdrometer による降雨強度比較

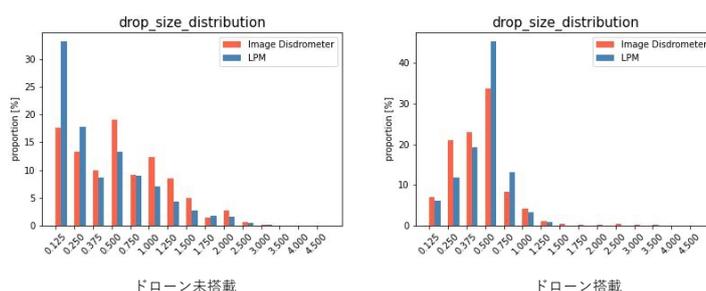


図 8 LPM と Image Disdrometer による雨滴粒径分布の比較

UAVによる上空での測定では、強風が想定される。強風に雨滴フットプリントの変形が生じれば Image Disdrometer の解析誤差につながる。風洞実験装置を用い、平板に付着した水滴の変形と風速の関係を検証した。図 9 に結果を示す。30 秒間一定の風速を与えた場合の変形量を示している。Image Disdrometer は 4~5fps で撮影が可能であり、直径 15 mm 程度の大水滴であっても連続する画像間の水滴変形量は 0.005 mm であり、Image Disdrometer の画像解像度を考えれば風速による水滴フットプリントの変形の影響は無視できると言える。

図 10 に Image Disdrometer に水滴を付着させ、UAV に載せ飛行させたときの水滴フットプリントの変化を示す。連続する画像間で水滴の球等価直径は 2.457 mm から 2.543 mm に増加したが、LPM の対象とする雨滴分解能を慮

すれば影響は無視できると言える。

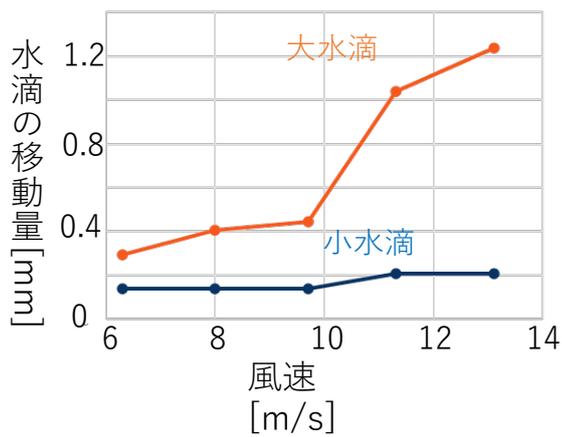


図 9 水滴フットプリントの変形と風速の関係。30 秒間定常風速を与えた場合の変形量。

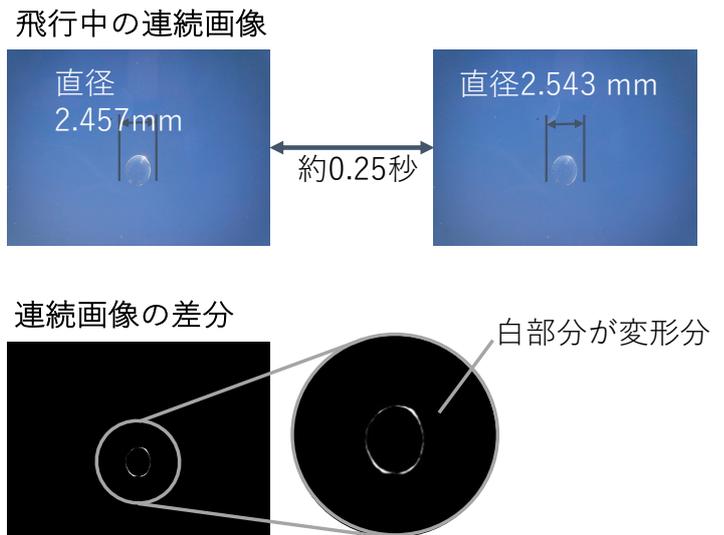


図 10 UAV 飛行に伴う Imager Disdrometer 上の水滴フットプリントの変化。

#### <引用文献>

- ① 小野村 史穂, 鈴木 宏輔, 仲吉 信人: Image Disdrometer の開発、土木学会論文集 B1(水工学)、75 巻 2 号 p. I\_1159-I\_1164、2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 HAYASHI Motoki, NAKAYOSHI Makoto, ONOMURA Shiho, TAMURA Ryusei	4. 巻 80
2. 論文標題 ESTIMATION OF RAINFALL INTENSITY BASED ON FREQUENCY ANALYSIS OF RAINFALL SOUND FALLING ON UMBRELLA	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-16191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TOSHIMA Shogo, NAKAYOSHI Makoto, HAYASHI Motoki	4. 巻 80
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF A NEW CAMERA SYSTEM FOR CLOUD IMAGE VELOCIMETRY	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-16190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 HAYASHI Motoki, NAKAYOSHI Makoto, ONOMURA Shiho, TAMURA Ryusei
2. 発表標題 Attempt of Rainfall Intensity Estimation with Rainfall Sound
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 TOSHIMA Shogo, NAKAYOSHI Makoto, HAYASHI Motoki, HIRANO Kohin, MAESAKA Takeshi
2. 発表標題 Comparison of Upper Wind Speed Estimated by Cloud Image Velocimetry and Cloud Radar and Development of a New Instruments for Cloud Image Velocimetry with Time
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林資樹、仲吉信人、平野洪賓、前坂剛
2. 発表標題 Cloud Image Velocimetry の解析可能な雲種別の検討と雲レーダを用いた風速精度検証
3. 学会等名 2022年度日本ヒートアイランド学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小野村 史穂  (Onomura Shiho)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------